

铸造充型过程宏观数值模拟研究进展

牛晓峰 王天成 葛涛涛 张鸣宇 马 巨 赵静雨
(太原理工大学材料科学与工程学院)

摘 要 综述了铸造充型过程宏观数值模拟研究的现状。给出了铸造充型过程宏观模拟所涉及的物理模型,并以三维带障碍物溃坝模型、平板件充型流动场为例,基于光滑粒子流体动力学(SPH)方法进行了模拟计算。阐述了常见的网格划分类型和数值求解方法,对比了不同数学方法的特点。说明了铸造充型多相流模拟的研究情况,并指出进行流动场气、液、固三相流宏观数值模拟,能够准确地预测夹渣、冷隔、浇不足、气孔等铸造缺陷,可考虑采用多数学方法耦合的思路处理。SPH 的公式构造并不受粒子分布的随意性的影响,可以自然地处理一些具有极大变形的问题。通过图形处理器技术(GPU)能够大幅提高 SPH 的计算效率。将人工智能机器学习技术和确定性物理建模相耦合,有助于优化传统的数值求解算法,提高精度,使模拟结果更接近于实际生产。

关键词 宏观过程;数值模拟;流动场;多相流;人工智能

中图分类号 G353.11;TP311;O242 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.010.002 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**

Research Progress in Macroscopic Numerical Simulation of Casting Filling Process
Niu Xiaofeng, Wang Tiancheng, Ge Taotao, Zhang Mingyu, Ma Ju, Zhao Jingyu
(School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology)

Abstract: The research status of macroscopic numerical simulation of casting filling process was reviewed. The physical models involved in the macroscopic process simulation of casting filling were presented. Taking the three-dimensional dam-break model with obstacles and the filling flow field of flat plate as instance, the simulation calculation was carried out based on SPH method. The common meshing types and numerical solution methods were expounded, and characteristics of different mathematical methods was analyzed comparatively. The situation of multiphase flow simulation of casting filling was illustrated, and it is pointed out that the macroscopic numerical simulation of gas-liquid-solid three-phase flow in flow field can accurately predict casting defects such as slag inclusion, cold shut, misrun and porosity, which can be processed by the coupling of multiple mathematical methods. The formula construction of SPH is not affected by randomness of particle distribution, which can naturally deal with some problems with great deformation. The computational efficiency of SPH can be greatly improved by Graphics Processing Unit(GPU) technology. Coupling artificial intelligence machine learning technology with deterministic physical modeling helps to optimize traditional numerical solution algorithms and improve accuracy, making simulation results closer to actual production.

Key Words: Macroscopic Process, Numerical Simulation, Flow Field, Multi-phase Flow, Artificial Intelligence

20 世纪 60 年代开始,从最初铸钢件的温度场模拟,到流动场模拟、应力模拟以及组织模拟,铸造模拟经历了从宏观到微观的过程。计算机数值模拟技术可以有效地再现和预测铸造工艺过程中可能出现的问题,从而实现工艺过程的优化,降低制造成本^[1]。宏观模拟在理论上基本已趋于成熟,但是在一些关键技术以及实际工程应用上还存在许多亟待解决的问题。

在 1980 年代初期,HWANG W S 等^[2]通过将计算

流体动力学的结果与浇注和填充问题相结合,研究了浇注和充型过程的数值模拟计算。20 世纪 80 年代后期,越来越多的学者开始研究铸造充型过程的数值模拟,并逐渐将重点从二维过程转移到了三维过程。PARADIES C J 等^[3]通过 N-S 方程及非牛顿表观黏度模型分析了半固态合金的流动。自 21 世纪以来,对铸造充型过程的数值模拟的研究变得更加深入、详细和准确。LEE D Y 等^[4]模拟了半固态镁合金的填充过程,

收稿日期:2023-08-25
基金项目:中央引导地方科技发展资金资助项目(YDZJSX2022A012)
第一作者简介:牛晓峰,男,1982 年出生,教授,太原(030000),E-mail:niuxiaofeng@tyut.edu.cn
引用格式:牛晓峰,王天成,葛涛涛,等. 铸造充型过程宏观数值模拟研究进展[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(10):1 312-1 318.
NIU X F, WANG T C, GE T T, et al. Research progress in macroscopic numerical simulation of casting filling process[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(10):1 312-1 318.

并分析了熔融金属黏度对充型过程的影响。MEBRIDE D等^[5]开发了一种新的计算模型来处理离心铸造方面问题,可以在填充复杂的铸件时捕获流体自由流动的表面细微之处,同时发现在气液相界面产生的流体浓缩物,采用水动力模型进行试验,运用高速摄影机捕获水的填充过程,并与模型模拟结果对比,验证了模拟结果的正确性。HUMPHREYS N J等^[6]通过对TiAl基合金离心铸造与重力铸造充型过程中自由表面的研究,给出了不同铸造工艺下铸件的自由表面变化过程,为离心铸造充型过程的模拟与铸件缺陷预测提供了理论基础,并通过试验对研究成果进行了验证^[7]。CLEARY W P等^[8]证明了SPH作为预测复杂薄壁模具填充行为的计算工具的适用性。SARKAR S等^[9]通过数值研究表征叠加磁场影响下的连铸模具中的单相和多相流体动力学,建立了三维单相和两相磁流体流动和湍流模型。LOBOVSKY L等^[10]通过对剪切稀化流体重力铸造过程中自由表面流动的预测,设计了测试装置,通过光学测量来分析铸件流动,并实现了基于晶格玻尔兹曼方法的内部计算流体动力学求解器。

自20世纪80年代,我国开始对铸造充型过程的数值模拟进行研究。邱伟等^[11]使用共轭梯度法求解基于改进的VOF方法的离散化迭代方程,并对自由表面进行处理并修正误差。王罡等^[12]调整效率参数利用多节点优势,改进算法提高了计算效率。赵静雨^[13]建立了基于SPH方法的铸造充型过程的三维数学模型,并通过水力学算例验证了模型的正确性。杨铭等^[14]自主开发针对熔模铸造蜡模充型过程的数值模拟软件,采用Cross-WLF黏度模型描述蜡料的流变性能,基于Projection VOF方法进行蜡料流动过程速度场、压力场以及自由表面的求解。

基于此,综述了国内外铸造充型过程宏观数值模拟研究的现状,给出了宏观数值模拟流动场计算模型,基于SPH方法对三维带障碍物溃坝过程、平板件充型流动场进行了模拟计算。阐述了常见的网格划分类型和数值求解方法,说明了气、液两相流和气、液、固三相流充型过程数值模拟技术的研究进展,阐明了宏观铸造充型模拟的发展趋势,以为模拟技术的发展提供参考。

1 流动场模型及流动场模拟计算结果举例

1.1 流动场模型

流体力学的基本控制方程是基于质量守恒、牛顿第二定律和能量守恒原理得到的。这一系列的方程即为Navier-Stokes方程^[15]。

根据质量守恒定律推导连续性方程有:

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla \cdot v \quad (1)$$

式中, $\frac{d\rho}{dt}$ 为物质导数; ρ 为密度; $\nabla \cdot v$ 为速度散度。

根据牛顿第二定律,将充型过程看成不可压缩流动,考虑流体的黏性作用,动量方程如下:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{1}{\rho} \eta \nabla^2 v + f \quad (2)$$

式中,等式右边的第一项称为压力项; P 为压力;第二项为黏性项; η 为流体的动力黏性系数; v 为流体的速度; f 为外力项。

根据能量守恒定律推导出能量方程:

$$\frac{de}{dt} = \frac{\sigma}{\rho} \nabla \cdot v \quad (3)$$

式中, e 为流体能量; σ 为总应力张量。

以光滑粒子法(SPH)为例,对连续性方程和动量方程通过引入SPH形式粒子近似法进行离散,得到离散形式的基本方程组。

连续性方程通过采用连续性密度法求和再进行SPH法近似,可以得出:

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \sum_{j=1}^N m_j v_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij} \quad (4)$$

式中, v_{ij} 为相对速度, $v_{ij} = v_i - v_j$; ρ_i 为粒子的密度; m_j 为粒子 j 的质量, $\nabla_i W_{ij}$ 为粒子 j 对粒子 i 产生影响的光滑函数的梯度算子。

动量方程的处理上,首先将压力项进行离散求解得到:

$$\frac{dv_i}{dt} = - \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} \right) \nabla_i W_{ij} + \frac{1}{\rho} \eta \nabla^2 v_i + f \quad (5)$$

推导出不可压缩流体的动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{dv_i}{dt} = & - \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} \right) \nabla_i W_{ij} + \\ & \sum_{j=1}^N m_j \frac{\eta_i + \eta_j}{\rho_i \rho_j} v_{ij} \left(\frac{1}{r_{ij}} \cdot \frac{\partial W_{ij}}{\partial r_{ij}} \right) + f \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $r_{ij} = |r_i - r_j|$,表示 i 粒子和 j 粒子的间距。

1.2 流动场模拟计算结果举例

1.2.1 三维带障碍物溃坝模型 SPH 模拟结果

基于SPH法进行流动场计算,带障碍物溃坝模型与经典溃坝模型相比,增加白色石块为障碍物。图1为基于SPH法三维带障碍物溃坝过程模拟结果图。图中灰色与白色粒子均为固体边界粒子,粒子数为34 816,黑色粒子为水,粒子数为6 750。水的密度为 $1 \times$

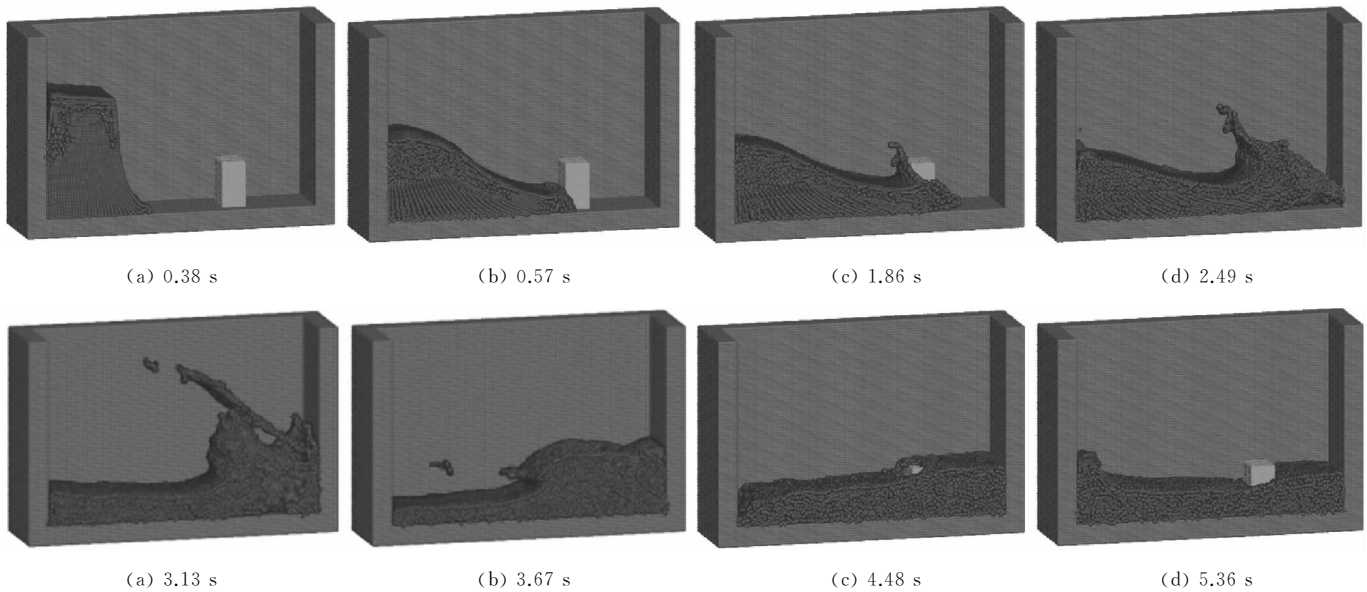


图 1 三维带障碍物溃坝模型 SPH 模拟结果图

Fig.1 SPH simulation results of dam break model with obstacles

10^3 kg/m^3 ,动力黏度为 $1\times 10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{s}$,流体的最大速度可以用来近似,初始流体高度为 30 mm,粒子间距为 1 mm,光滑长度为 1.5 倍的粒子间距。可以看出,0.38 s 时水柱开始坍塌,0.57 s 时水波与石块接触,1.86 s 时水波被石块反弹,2.49 s 时水波越过石块与侧壁接触,3.31 s 时水波被侧壁反弹,3.67~5.36 s 水波来回波动,波动幅度越来越小,最终趋于静止。

1.2.2 平板件充型流动场 SPH 模拟结果

平板件充型过程中,金属液由右侧直浇道注入型腔

内部,从平板件底部向上逐渐填充直至充型完成,并将试验结果(通过高速摄像机拍摄获得)和 SPH 模拟结果进行了对比,见图 2。模拟计算时,计算区域已经被离散成一系列的 SPH 粒子,总粒子数为 205 512,其中灰色粒子代表虚粒子边界,黑色粒子代表金属液。 t_1 时刻金属液由浇注系统开始向铸件内部充型,金属液在铸件内部有飞溅趋势; t_3 时刻金属液呈现中间高,两边低的液面形状,并向两侧运动冲击型腔; t_4 时刻充型过程比较稳定,液面逐步上升。

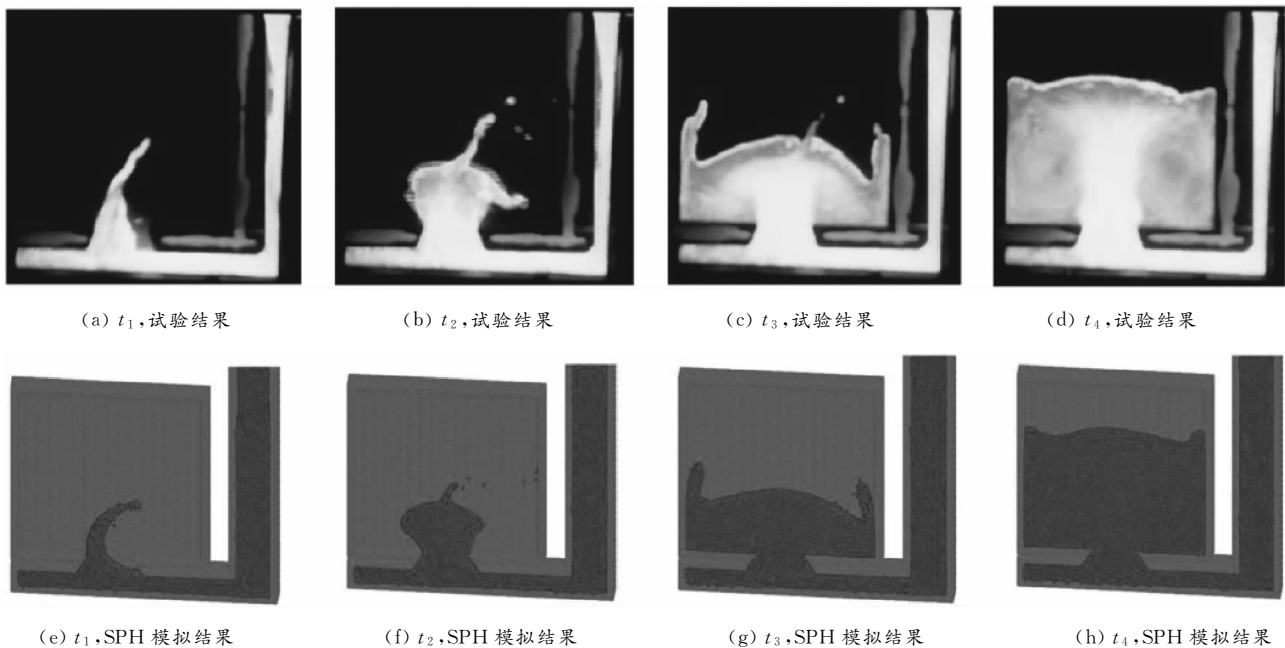


图 2 平板件充型过程

Fig.2 Filling process of plate

2 网格划分类型和数值求解

近年来,针对铸造宏观过程模拟的网格划分类型和数值求解算法均有了长足的进展^[16]。从最初的差分网格^[17],逐步出现四面体网格^[18]、自适应六面体网格^[19]甚至混合网格^[20],见图 3。与网格划分类型相对应,相关数值求解算法也逐步应用到铸造宏观过程模拟中,主

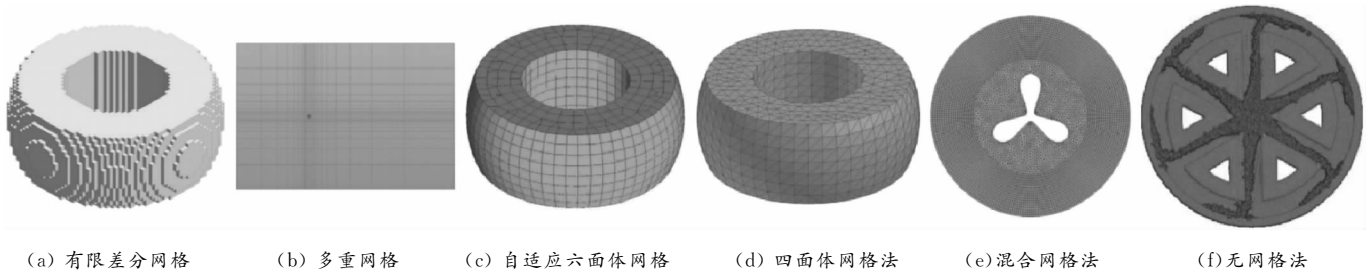


图 3 不同的网格类型^[16]

Fig.3 Different mesh types

FDM 离散过程简单,且较容易编程实现,因此,最早应用于铸造宏观过程模拟^[16,25-26]。由于 FDM 追踪的是流过网格单元边界的质量、动量和能量的通量,故自由表面、变形边界和运动物质交界面的位置就很难精确定^[16,27-32],造成 FDM 求解流场的准确性和稳定性难以保证。FEM 离散过程复杂,流动计算中需耗费大量的时间来再生网格。因此,主要应用于铸造宏观凝固及应力场模拟^[16,33]。

FVM 物理意义较为明确,具有局部守恒性,且适用于任何网格类型,因此,广泛应用于计算流体动力学分析(包括铸造宏观充型过程模拟)^[16,34]。虽然 FVM 适用于任何网格类型,但并不代表任何网格类型下的 FVM 求解精度是一致的,从流场计算的角度来说,自适应六面体网格下的 FVM 求解精度最好。

无网格算法(如 SPH)的主要思想是将连续介质用相互作用的质点组来描述,各个物质点上承载各种物理量,通过求解质点组的动力学方程和跟踪每个质点的运动轨道,获得整个系统的力学行为。无网格算法的准确性取决于粒子数目的多少,近年来随着计算能力(尤其是 GPU 运算)的提高,无网格算法的准确性越来越高。无网格算法主要应用于铸造宏观充型过程模拟^[16,35]。

目前,用于计算铸造充型过程较多的商业软件(如

要包括有限差分法(FDM)^[21]、有限元法(FEM)^[22]和有限体积法(FVM)^[23]等。近年来,随着计算能力的大幅提高,无网格算法如光滑粒子法(SPH)^[24]也逐渐应用在铸造宏观过程模拟中。有限差分法适用于差分网格和多重网格,有限元法适用于除混合网格之外的其他网格类型,有限体积法适用于任何网格类型,无网格算法(如 SPH)只需定义边界范围^[16]。

ProCAST)采用有限元网格,网格划分复杂,但网格能较好地定义曲面,接近实际^[16]。其求解格式复杂,计算时间长,本身计算精度高,但网格划分不当会带来误差。MAGMA 采用有限差分网格,网格分割简单、快速,网格出错少。由于划分的六面体网格有阶梯形状,只能简化地描述曲面,求解计算简单,易于实现,本身计算精度低,网格分割细时可提高计算精度^[16,36]。Flow 3D 采用有限体积法进行数值模拟计算,其计算准确度极高,参数设置合理,准确度可达 90% 以上^[16]。Flow 3D 采用流体动力学方法,如稳定性的提高和独有的自由表面跟踪技术,不足的地方是计算速度相对较慢^[16]。

3 两相流模型中气相对充型过程影响

除少部分铸造工艺,如真空定向凝固工艺^[16,37]等,绝大部分铸造充型过程中,气相对充型过程影响较大,因此,流动场模型中需考虑气相的作用。图 4 为不同流动场模型下的充型过程模拟结果对比^[16]。可以看出,采用单相流模型时,充型过程中金属液内部的气相区会“凭空消失”,见图 4a。采用两相流模型时,充型过程中金属液内部的气相在液相的作用下运动,见图 4b。一般采用连续表面力(Continuum surface force,CSF)模型^[38]来计算两相流界面表面张力^[16]。

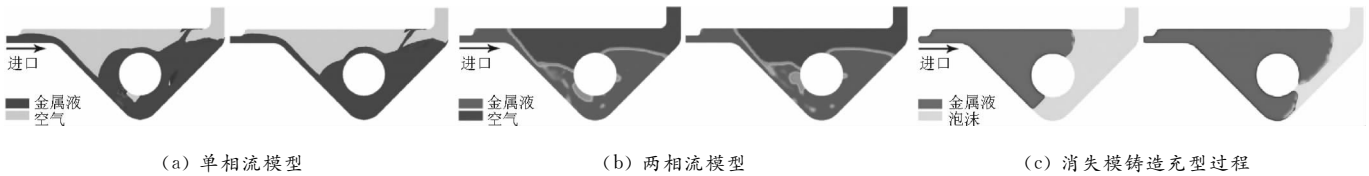


图 4 不同流动场模型下的充型过程模拟结果对比^[16]

Fig.4 Simulation result comparison of filling process under different flow field models

消失模铸造过程中,泡沫模样在高温金属液的作用下分解气化,会在金属液前沿与模样之间产生气隙层,气隙层的存在显著降低了金属液的充型能力,使得消失模铸造的界面推移方式与其他铸造工艺明显不同,见图 4e 和图 4f。针对消失模铸造过程中的界面推移,国内外学者进行了大量研究^[16,39-41],其中应用较广的界面推移模型为气隙压力方程法^[42],该方法通过气隙中泡沫模样的质量守恒方程,导出气隙中的反压阻力,并将其应用至消失模铸造流动场模型中^[16]。

4 气、液、固三相流充型过程数值模拟

传统的铸造过程数值模拟技术主要是基于网格的,尽管基于网格方法已发展比较成熟,但是对于一些特殊问题的处理仍存在困难,如在基于 FEM 的流动计算中,需耗费大量的时间来再生网格,且对于复杂形状实体的网格划分比较困难,在数值模拟过程中经常会出现因网格畸变而导致求解精度下降等问题;而基于 FDM 的流动计算,由于 FDM 追踪的是流过网格单元边界的质量、动量和能量的通量,故自由表面、变形边界和运动物质交界面的位置很难精确确定。

SPH 法是基于拉格朗日方程描述的,在计算过程中不需要对网格进行划分,从而避免了因网格的生成、再生或者网格的缠结和扭曲导致求解精度下降和数值发散等问题;SPH 法是一种纯拉格朗日的粒子类方法,能够通过追踪粒子的位置来捕捉自由表面及多相物质交界面的运动规律,在研究流体自由表面、运动物质交界面及多相流等方面非常有影响力和较好的应用前景^[43-45]。

MONAGHAN J J 等^[46]推导出了适合 SPH 方法弱可压缩多相流的基本模型,但是该模型只适合于模拟密度相差不大的多相流问题,并且在计算过程中很容易因为界面不稳定而导致计算崩溃。COLAGROSSI A 等^[47]采用 SPH 法研究气液两相流问题,同时引入内聚力模型,推导出了适合气液两相流的状态方程以及动量

方程,并通过数值模拟与试验对比研究了单个气泡上浮过程以及溃坝问题的多相流。ADAMI S 等^[48]采用 SPH 方法研究了大密度差的气液两相流问题,推导出了适合大密度差气液两相流的黏性力方程、压力梯度方程以及连续性方程,并引入了连续表面张力模型,初步实现了模拟液滴在空气中的变化过程^[49-50]。目前出现了一些耦合方法来处理流固耦合问题,CANELAS R B 等^[51]将 DEM 方法与 SPH 方法进行耦合,可以模拟固相之间的相互作用,但耦合后计算模型复杂,计算精度不高。

在铸造充型过程中,金属液表面的空间形状及变化十分复杂,可能会出现金属液的表面的折叠或者相交而导致合并,且在实际金属液充型流动过程中可能会出现气泡、金属夹杂物或者因流动的不连续出现新的自由表面,这往往需要借助 SPH 法或 SPH-DEM 耦合对自由表面、运动交界面和渣团等进行追踪,从而准确预测夹渣、冷隔、浇不足、气孔等铸造缺陷,在铸造领域有广阔的应用前景,但有很多关键性问题仍待解决。金属液的流动大多是紊流,而且充型时间很短,并伴有传热现象,流动场和温度场都在不断变化相互影响。

通过简化模型,基于 SPH 方法对二维平板件中空气、渣团耦合金属液的流动过程进行模拟,铸件的材质为纯铝,密度为 $2\,700\text{ kg/m}^3$,动力黏度为 $4.5 \times 10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{s}$,空气的密度为 1.2 kg/m^3 ,动力黏度为 $1.77 \times 10^{-5}\text{ Pa}\cdot\text{s}$,浇注温度为 $700\text{ }^\circ\text{C}$,总粒子数为 65 055 个,固定边界粒子数约为 3 127 个,金属液粒子数约为 40 245 个,空气粒子数约为 21 458 个,总的渣团数为 25 个。当充型时间为 0.41 s 时,随机设置的 18 个白色的渣团粒子已进入型腔且直浇道中黑色空气粒子已被灰色的金属液粒子全部排出;充型时间为 1.4 s 时,25 个白色的渣团粒子已全部流入型腔中并随着灰色的金属液的充型流动;充型时间为 2.32 s 时,型腔中的白色渣团粒子逐渐上浮并最终向平板件的左上角聚集,而白色的空气粒子则已经全部排出型腔。

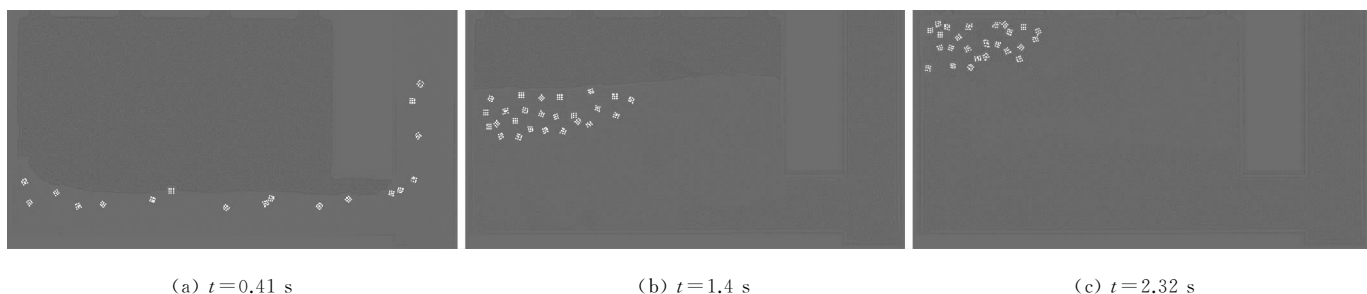


图 5 气、液、固三相流充型过程数值模拟结果

Fig.5 Numerical simulation results of gas-liquid-solid three-phase flow filling process

5 技术展望

宏观铸造充型模拟在理论上已趋于成熟,但是在一些关键技术以及实际工程应用上还存在许多亟待解决的问题,如进行铸造充型过程气、液、固三相流宏观数值模拟,能够准确地预测夹渣、冷隔、浇不足、气孔等铸造缺陷,在铸造领域有广阔的应用前景,可考虑采用多数学方法耦合的思路处理。

为进一步提高铸造宏观流动场模拟的准确性,选用自适应六面体网格和混合网格类型更为合适(基于FVM方法进行充型过程计算)。SPH是一种Lagrange形式的无网格粒子法,相对于常见的网格数值方法,拥有一些特别的优点,其中最重要的一个特性是SPH的自适应性。SPH的公式构造并不受粒子分布的随意性的影响,因此可以很自然地处理一些具有极大变形的问题。但计算效率问题依然是制约SPH发展的一个重要因素,特别是在处理三维问题时。发展图形处理器技术(GPU)能提高SPH的计算效率达到几倍甚至几十倍,成为提高SPH计算效率的重要途径之一。

数值模拟技术可以显著缩短产品研发周期,降低生产成本,是工艺设计走向数字化、智能化的重要手段,但仿真分析忽略了过往生产数据的重要性,而且还需要基于人工专家知识提出工艺优化解决方案,对于人工有着较高的经验水平要求。机器学习作为材料基因工程的典型技术,基于数据建立预测模型,实现研发模式由“经验指导试验”向“理论预测、试验验证”的智能化模式转变,可弥补传统试验和传统仿真的不足。将人工智能机器学习技术和确定性物理建模相耦合,有助于优化传统的数值求解算法,加快计算模拟速度,提高精度,使模拟结果更接近于实际生产。

参 考 文 献

- [1] RAVI B, JOSHI D. Feedability analysis and optimisation driven by casting simulation[J]. Indian Foundry Journal, 2007(6): 53-55.
- [2] HWANG W S, STOEHR R A. Fluid flow modeling for computer-aided design of castings[J]. JOM, 1983, 35(10): 22-29.
- [3] PARADIES C J, RAPPAZ M, IMWINKELRIED T, et al. Simulation of the Pressure Die Casting of a Thixotropic Aluminium Alloys [A]. Proceedings of the 4th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites[C], UK: Sheffield, 1996.
- [4] LEE D Y, MOON J H, SEOK H K, et al. Computer simulation for die filling behavior of semi-solid slurry of Mg alloy[J]. Journal of the Korea Foundry Society, 2007, 27(1): 31-35.
- [5] MCBRIDE D, HUMPHREYS N J, CROFT T N, et al. Complex free surface flows in centrifugal casting: Computational modeling and validation experiments[J]. Computers and Fluids, 2013, 82(16): 63-72.
- [6] HUMPHREYS N J, MCBRIDE D, SHEVCHENKO D M, et al. Modelling and validation: Casting of Al and TiAl alloys in gravity and centrifugal casting processes[J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(14-15): 7 633-7 643.
- [7] 鲁素玲. 卧式离心复合铸造轧辊铸造过程及工艺影响的数值模拟[D]. 河北秦皇岛: 燕山大学, 2016.
- [8] CLEARY W P, SAVAGE G, HA J, et al. Flow analysis and validation of numerical modelling for a thin walled high pressure die casting using SPH[J]. Computational Particle Mechanics, 2014, 1(3): 229-243.
- [9] SARKAR S, JATAV S K, SINGH V, et al. Characterization of single and multiphase hydrodynamics in continuous slab casting mold in the presence of applied magnetic field[J]. JOM, 2018, 70: 2 980-2 992.
- [10] LOBOVSKY L, BUBLIK O, HEIDLER, V, et al. Numerical and experimental prediction of free surface flow of shear-thinning fluids [J]. Computers and Fluids, 2021, 225(1): 104 969.
- [11] 邱伟, 高志强, 柳百成. 用改进的 SOLA-VOF 法模拟铸造充型过程[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1997(11): 44-47, 58.
- [12] 王翌, 熊守美, 都志辉. 压铸充型过程模拟并行搜索算法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002(8): 49-51, 59.
- [13] 赵静雨. 基于光滑粒子流体动力学的铸造充型过程三维数值模拟[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- [14] 杨铭, 廖敦明, 陈宇豪. 基于 Projection VOF 方法的熔模铸造蜡模充型过程数值模拟[J]. 铸造, 2023, 72(2): 107-114.
- [15] 赵展. 基于 SPH-FEM-FDM 的多数学模型耦合挤压铸造过程模拟及结合 PFM 的多尺度微观组织模拟与热裂预测[D]. 太原: 太原理工大学, 2023.
- [16] 廖敦明, 曹流, 孙飞, 等. 铸造宏观过程数值模拟技术的研究现状与展望[J]. 金属学报, 2018, 54(2): 161-173.
- [17] DABADE U A, BHEDASGAONKAR R C. Casting defect analysis using design of experiments (DoE) and computer aided casting simulation technique[J]. Procedia CIRP, 2013(7): 616-621.
- [18] 曹流, 廖敦明, 周聪, 等. 基于有限元法的多材质铸造温度场模拟软件开发[J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35(11): 1 163-1 166.
- [19] LIU L J, NAKANO S, KAKIMOTO K. Dynamic simulation of temperature and iron distributions in a casting process for crystalline silicon solar cells with a global model[J]. J. Cryst. Growth, 2006, 292: 515-518.
- [20] SANG W M, LI F W. An unstructured/structured multi-layer hybrid grid method and its application[J]. Int. J. Numer. Meth. Fluids, 2007, 53: 1 107-1 125.
- [21] MITCHELL A R, GRIFFITHS D F. The Finite Difference Method in Partial Differential Equations[M]. Chichester: John Wiley and Sons, 1980.
- [22] 曹流, 廖敦明, 曹腊梅, 等. 基于有限元法的熔模铸造过程温度场模拟软件自主开发[J]. 铸造, 2014, 63(12): 1 235-1 240.
- [23] KIM J W, KIM D J, CHOI H C. An immersed-boundary finite-volume method for simulations of flow in complex geometries[J]. J. Comput. Phys., 2001, 171(1): 132-150.
- [24] LIU G R, LIU M B. Smoothed Particle Hydrodynamics: A Mesh-free Particle Method[M]. Singapore: World Scientific, 2003.
- [25] GROZDANIĆ V. Finite-difference methods for simulating the solidification of castings[J]. Mater. Technol., 2009, 43(5): 233-237.

- [26] CHEN T, LIAO D M, ZHOU J X. Numerical simulation of casting thermal stress and deformation based on finite difference method[J]. Mater. Sci. Forum, 2013, 762: 224-229.
- [27] SEN P, DATTA S K. Acomputational study on the viscous in compressible laminar separated flow in a unit square cavity[J]. British Journal of Mathematics & Computer Science, 2014, 4(23): 3 312-3 327.
- [28] 周建新. 铸造计算机模拟仿真技术现状及发展趋势[J]. 铸造, 2012, 61(10): 1 105-1 115.
- [29] 华建锋, 江利, 纪少南. 铸造过程数值模拟分析技术的研究[J]. 2011.
- [30] 张明远, 陈立亮, 庞盛永, 等. 基于投影-水平集方法的复杂铸件充型过程气-液两相流数值模拟[J]. 铸造, 2010, 59(5): 478-481.
- [31] LIPNIKOV K, MANZINI G, SHASHKOV M. Mimetic finite difference method[J]. Journal of Computational Physics, 2014, 257: 1 163-1 227.
- [32] 汪辉. 铸件充型过程三维数值模拟[D]. 济南: 山东大学, 2010.
- [33] LI C S, THOMAS B G. Thermomechanical finite-element model of shell behavior in continuous casting of steel[J]. Metall. Mater. Trans., 2004, B35: 1 151-1 172.
- [34] VERSTEEG H K, MALALASEKERA W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method[M]. New York: Pearson Education, 2007.
- [35] LIU M B, LIU G R. Smoothed particle hydrodynamics(SPH): An overview and recent developments[J]. Arch. Comput. Meth. Eng., 2010, 17: 25-76.
- [36] 李璟, 李重视, 张迎春, 等. FEM 与 FDM 在脑电正问题求解中的比较[J]. 浙江大学学报, 2008, 42 (4): 647-650.
- [37] ELLIOTT A J, POLLOCK T M. Thermal analysis of the Bridgman and liquid-metal-cooled directional solidification investment casting processes[J]. Metall. Mater. Trans., 2007, A38: 871-882.
- [38] BRACKBILL J U, KOTHE D B, ZEMACH C. A continuum method for modeling surface tension[J]. Journal of Computational Physics, 1992, 100(2): 335-354.
- [39] 陈亚娟. 消失模铸造充型过程数值模拟研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [40] LIU X J, BHAVNANI S H, OVERFELT R A. Simulation of EPS foam decomposition in the lost foam casting process[J]. J. Mater. Process. Technol., 2007, 182(1-3): 333-342.
- [41] 张倩. 灰铸铁件消失模铸造过程模拟研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2012.
- [42] WEI Z J, LI T X, AN G Y, et al. Numerical calculation of gas pressure and gap width in lost foam process[J]. J. Harbin Inst. Technol., 1995, 27(4): 126.
- [43] 强洪夫. 光滑粒子流体动力学新方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [44] BONET J, KULASEGARAM S. Correction and stabilization of smooth particle hydrodynamics methods with applications in metal forming simulations[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2015, 47(6): 1 189-1 214.
- [45] PRAKASH M, CLEARY P W. Modelling highly deformable metal extrusion using SPH[J]. Computational Particle Mechanics, 2015, 2(1): 19-38.
- [46] MONAGHAN J J, KOCHARYAN A. SPH simulation of multi-phase flow[J]. Computer Physics Communications, 1995, 87(1): 225-235.
- [47] COLAGROSSI A, LANDRINI M. Numerical simulation of interfacial flows by smoothed particle hydrodynamics[J]. Journal of Computational Physics, 2003, 191(2): 448-475.
- [48] ADAMI S, HU X Y, ADAMS N A. A new surface-tension formulation for multi-phase SPH using a reproducing divergence approximation[J]. Journal of Computational Physics, 2010, 229 (13): 5 011-5 021.
- [49] 孙鹏楠, 李云波, 明付仁. 自由上浮气泡运动特性的光滑粒子流体动力学模拟[J]. 物理学报, 2015, 64(17): 207-221.
- [50] 周杰, 徐胜利. SPH 方法的运动边界条件研究[J]. 计算力学学报, 2016, 33(3): 412-417.
- [51] CANELAS R B, CRESPO A J C, DOMÍNGUEZ J M, et al. SPH-DCDEM model for arbitrary geometries in free surface solid-fluid flows[J]. Computer Physics Communications, 2016, 202: 131-140.

(编辑: 彭瑾)

特斯拉一体化压铸或迎来新突破

日前, 路透社报道, 特斯拉在一体式压铸技术上迎来新的突破, 可对整个复杂车身底部实现一体式压铸。当前, 车底结构从原来的数百个零部件焊接拼合进化到由前后结构件加上中间部分的三段式结构已经逐渐成为新能源车企的主流。而特斯拉的目标, 则是把这三段式结构进一步整合为一体式结构。该新技术运用后将开发一款新车的时间缩短至 18~24 个月, 同时造车成本也将再一次实现大幅下降。

目前特斯拉尚未决定是否要在下一代车型上使用这项新技术。从报道内容来看, 主要原因在于虽然整体技术实现突破, 但真正要投入量产应用还有多个问题未能解决。

不过要将整个车身底部用一体压铸技术来实现, 目前来看, 还需要解决两大问题。一是如何低成本地设计并测试这个巨大且复杂部件的模具, 并最终将其投入大规模生产, 其中也包括是否已经有相应的压铸机。二是在将整个底部结构整合为一个部件, 并采用压铸技术进行生产后, 需要解决空心副车架的铸造难题。

(摘自压铸周刊)